

**Abb. 1** Die fünf größten Uranusmonde im richtigen Größenmaßstab und zunehmendem Abstand vom Planeten (links nach rechts): Miranda, Ariel, Umbriel, Titania, Oberon (Foto: NASA/JPL).

## Die Welt der Eistrabanten Teil 2

# Die Eismonde von Uranus, Neptun und Pluto

ROLAND WAGNER

*Die Eismonde von Uranus, Neptun und Pluto zeigen eine große Vielfalt an Oberflächenformationen und weisen Ähnlichkeiten mit den Eismonden von Jupiter und Saturn auf. So gibt es offensichtlich auch im äußersten Bereich des Sonnensystems Kryoaktivität. Auch Dehnungsstrukturen und mögliche Auswirkungen von planetaren Kollisionen sind erkennbar.*

Als bislang einzige Sonde hat Voyager 2 Uranus und Neptun erreicht. Am 24. Januar 1986 flog sie in einem geringsten Abstand von 81500 km über der Wolkenoberfläche an Uranus vorbei [1]. Dieser Planet wird von fünf großen Monden umkreist (Abbildung 1), im Durchmesser vergleichbar den größeren Saturnmonden – mit Ausnahme von Titan. Von innen nach außen sind dies Miranda (472 km), Ariel (1158 km), Umbriel (1170 km), Titania (1578 km) und Oberon (1523 km). Die mittleren Dichten der Monde (Tabelle 1) bewegen sich zwischen  $1201 \text{ kg/m}^3$  bei Miranda und  $1715 \text{ kg/m}^3$  bei Titania [2], vergleichbar mit denjenigen der Eismonde Saturns. William Herschel, der 1781 Uranus entdeckte, spürte 1787 auch die beiden

größten Monde Titania und Oberon auf. Nach der Entdeckung von Ariel und Umbriel durch William Lassell im Jahr 1851 fand erst 1948 Gerard Kuiper den fünften großen Uranusmond Miranda. Weitere Monde waren bis zum Voyager-2-Vorbeiflug nicht bekannt.

Uranus besitzt wie Jupiter und Saturn ein Ringsystem (Abbildung 2). Der Planet weist zusammen mit seinem Ring- und Satellitensystem eine Besonderheit auf: Ihre Rotationsachsen sind um  $98^\circ$  gegenüber der Ekliptik geneigt. Die Monde und Ringteilchen bewegen sich in der Äquatorebene um den Planeten. Dadurch werden jeweils die Nord- und Südhemisphären von Uranus und seinen Monden einmal für ein halbes Uranusjahr, das insgesamt 84 Erdjahre dauert, von der Sonne beleuchtet.

Die Ursache für diese Schiefelage der Rotationsachse ist noch nicht genau bekannt, auch nicht, in welchem Zeitraum diese erfolgte. Vollzog sich das Umkippen der Achse graduell über einen längeren Zeitraum, so dürften sich auch die Bahnebenen der regulären Satelliten langsam der sich ändernden Lage der Äquatorebene angepasst haben, bis der heutige Zustand erreicht war [3]. Kippte die Rotationsachse dagegen verhältnismäßig schnell, beispielsweise verursacht durch den Einschlag eines sehr großen planetaren Körpers auf Uranus, so gibt es zwei mögliche Szenarien [3]. Erfolgte der Einschlag und das Umkippen der Rotationsachse vor der Entstehung der Satelliten, so bildeten sich diese in der nach dem Einschlag neu orientierten

*This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.*

Akkretionsscheibe. Geschah der Einschlag dagegen nach der Bildung des Satellitensystems, so wurden die ursprünglichen Monde dabei vermutlich zerstört, und aus deren Schutt entstand eine zweite Generation der heute bekannten fünf regulären Monde.

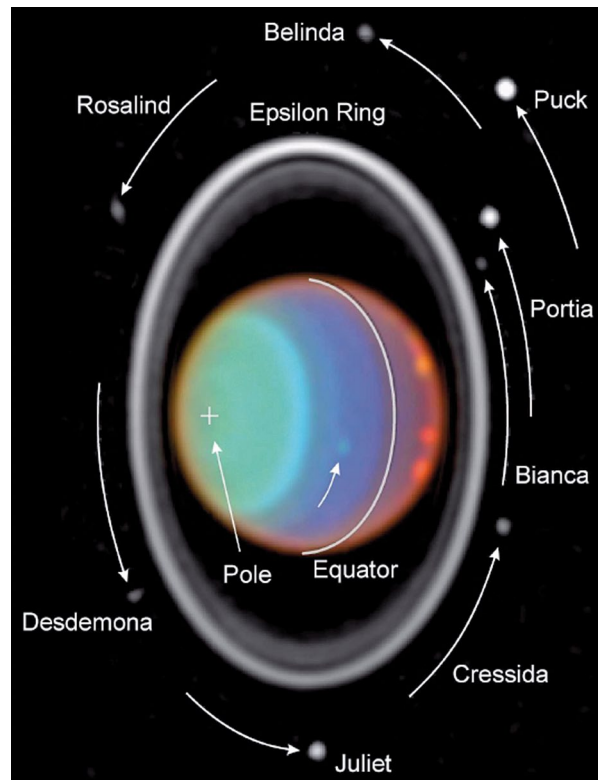
Während des Voyager-2-Vorbeiflugs erfassten die Kameras lediglich die Südhemisphären der fünf größten Monde. Wegen der Flugbahn wurden auch nur zwei der Monde (Miranda und Ariel) mit hoher räumlicher Auflösung fotografiert. Bis heute sind insgesamt 27 Uransatelliten bekannt, benannt nach Charakteren in den Werken von William Shakespeare und Alexander Pope. Diese Benennungskonvention geht auf den Astronomen John Herschel zurück, der 1852 die Namen für die ersten damals bekannten vier Monde vorschlug. Elf weitere Monde ließen sich mit Voyager 2 nachweisen.

Die mediale Aufmerksamkeit für die bisher einzige Beobachtung des Uransystems mit Voyager 2 trat im Jahr 1986 durch das Unglück des Space Shuttle Challenger in den Hintergrund, das vier Tage später explodierte. Im Voyager-Team wurde erwogen, sieben der elf kleineren Monde nach den tödlich verunglückten Astronauten zu benennen. Das Nomenklaturkomitee der IAU entschied jedoch die Benennungsregeln der Uranusmonde nach Charakteren von Shakespeare und Pope beizubehalten und benannte statt dessen sieben Krater auf der erdabgewandten Hemisphäre des Erdmonds nach den Opfern des Challenger-Unglücks.

Diese elf inneren Uranusmonde sowie zwei weitere im Jahr 2003 mit dem Weltraumteleskop Hubble entdeckte Satelliten kreisen alle innerhalb der Bahn von Miranda prograd (in Rotationsrichtung des Planeten) wie die fünf großen Monde um Uranus (Abbildung 2), teilweise auf sehr eng benachbarten Bahnen mit geringer Exzentrizität. Neun weitere, irreguläre Monde fand man nach 1997 mit erdgebundenen Teleskopen. Die Bahnen dieser vermutlich eingefangenen Monde weisen hohe Exzentrizitäten und Neigungen auf. Ein einziger von ihnen – Margaret – kreist retrograd, die anderen acht prograd um Uranus. Verglichen mit den fünf großen Monden sind diese 22 derzeit bekannten übrigen Satelliten mit Durchmessern zwischen etwa 18 km – Cupid und Trinculo – und 165 km – Puck und Sycorax – recht klein.

In spektralen Untersuchungen konnte auf allen fünf Hauptmonden Wassereis nachgewiesen werden, auf Ariel, Umbriel und Titania zusätzlich  $\text{CO}_2$  [4]. Die Oberflächen der fünf Monde zeigen eine erhebliche Bandbreite: einige waren in der Vergangenheit tektonisch und möglicherweise auch kryovulkanisch aktiv, andere blieben geologisch kaum verändert [5].

Beispiele für diese beiden Extremfälle sind die Monde Miranda und Umbriel (Abbildung 3). Bereits in niedriger Auflösung sind unterschiedliche Geländeformen auf Miranda, dem kleinsten der fünf Hauptmonde von Uranus, erkennbar (Abbildung 3 links). Neben altem, dichter bekratertem Gelände sind auf Miranda ovoidale Regionen aus parallelen Rillen und Rücken verbreitet, die so genannten *Coronae*

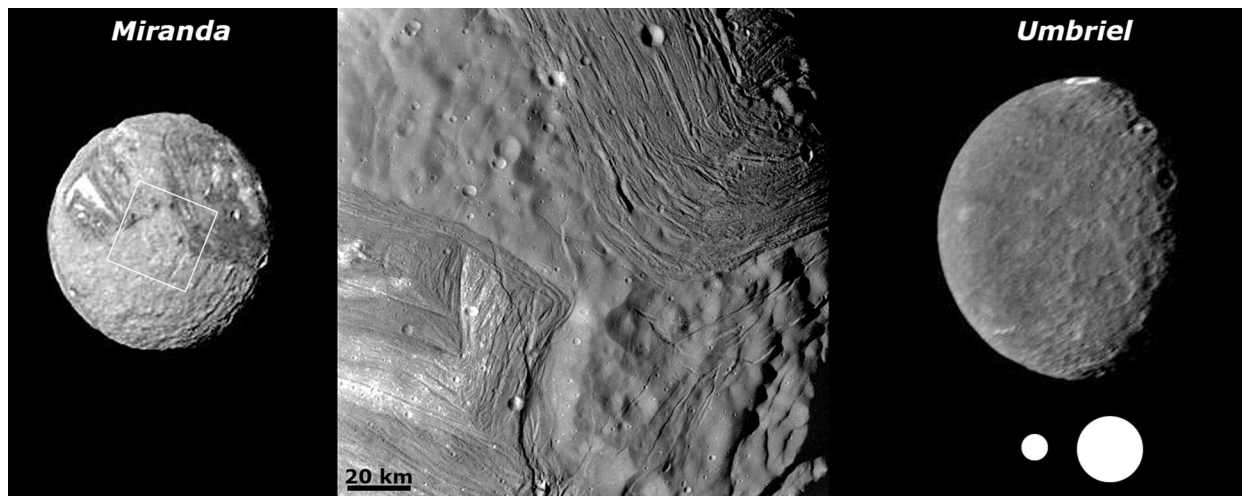


**Abb. 2** Das Ringsystem und acht der insgesamt dreizehn inneren kleinen Monde des Uranus, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop Hubble (Foto: NASA/JPL/STScI).

[5] (Abbildung 3 Mitte). Zusätzlich finden sich auf Miranda tektonische Verwerfungen mit einem Höhenunterschied bis zu 15 km. Wie diese Formen zustande kommen, ist nicht zweifelsfrei geklärt. Als Erklärung wird Dehnungstektonik über aufsteigenden geschmolzenen oder plastischen *Plumes* im Inneren diskutiert [5]. Alternativ könnte ein großer Einschlag den Mond in der Frühzeit fast vollständig zerstört haben, danach könnte durch Absinken schweren Materials zum Kern die als *Coronae* an der Oberfläche erhaltenen Formen entstanden sein [5].

**TAB. 1** DIE MONDE UND IHRE PLANETEN

Eismond	Zentralplanet	Mittlerer Durchmesser/km	Mittlere Dichte $\text{kg/m}^3$
Miranda	Uranus	471,6	1201
Ariel	Uranus	1157,8	1665
Umbriel	Uranus	1169,4	1400
Titania	Uranus	1577,8	1715
Oberon	Uranus	1522,8	1630
Triton	Neptun	2705,2	2061
Charon	Pluto	1212,6	1702



**Abb. 3** Die Oberflächen der Uranusmonde Miranda und Umbriel im Vergleich. Das Rechteck in der globalen Aufnahme von Miranda gibt die Lage der Detailaufnahme an (mittleres Bild). Der wesentlich kleinere Mond Miranda (der Größenvergleich mit Umbriel ist durch die beiden weiß gefüllten Kreise angegeben) ist geologisch deutlich weiter entwickelt als Umbriel (Fotos: NASA/JPL).

Im Vergleich zu Miranda zeigt die Oberfläche von Umbriel (Abbildung 3 rechts) eine dunkle, von Einschlagskratern dominierte Oberfläche, in der aber lokal vereinzelte tektonische Bruchstrukturen auftreten [5]. Die Abbildung dokumentiert ferner den Größenunterschied zwischen Miranda und Umbriel.

### Der Neptunmond Triton

Voyager 2 setzte nach dem Uranusvorbeiflug seine Reise zum Planeten Neptun fort. Sie erreichte ihn am 26. August 1989 und passierte ihn in einem minimalen Abstand von der Wolkenoberfläche von nur 4828 km. Vor diesem Vorbeiflug waren lediglich die Monde Triton, Nereid und Larissa bekannt. Voyager 2 entdeckte neun weitere, darunter den Mond Proteus (Abbildung 4). Mit 416 km Durchmesser ist er größer als der Saturnmond Mimas und der größte derzeit bekannte Mond, der keine annähernde Kugelgestalt aufweist [6]. Proteus ist durch eine überwiegend von Impaktkratern dominierte Oberfläche gekennzeichnet. Der in Abbildung 4 erkennbare größte Einschlagskrater Pharos besitzt einen Durchmesser von 230 km. Die Zahl der bekannten Monde Neptuns hat sich mittlerweile auf 14 erhöht, die meisten sind jedoch verhältnismäßig klein mit mittleren Durchmessern unter 100 km. Lediglich Despina (156 km), Galatea (175 km), Larissa (194 km), Nereid (~340 km) und Proteus (416 km) sind mit größeren Asteroiden vergleichbar.

Dem größten Neptunmond Triton galt beim Voyager-2-Vorbeiflug besondere Aufmerksamkeit. Mit einem

Durchmesser von 2705 km ist er ähnlich groß wie der Zwergplanet Pluto, und man vermutete, dass die Oberflächen von Triton und Pluto Ähnlichkeiten aufweisen könnten [6]. Triton ist mit einer mittleren Dichte von  $2061 \text{ kg/m}^3$  massiver als die größten Eismonde, Ganymed, Callisto und Titan, besitzt somit einen deutlich höheren Anteil von Gestein im Gesamtaufbau. Triton umkreist als einziger größerer Mond eines Planeten seinen Zentralkörper auf einer stark geneigten Bahn retrograd, also entgegen der Rotationsrichtung des Planeten. Dies wird als Hinweis darauf verstanden, dass er nicht zusammen mit Neptun entstand, sondern aus dem Kuiper-Gürtel stammend von Neptun eingefangen wurde [2, 7]. Triton ist nach neuester Theorie der „Überlebende“ des Einfangs eines ursprünglich aus zwei Teilen bestehenden planetaren Körpers [2, 7]. Der zweite Körper wurde beim Einfangprozess zerstört, während der übrig gebliebene Teil in eine stark exzentrische Bahn um Neptun gelangte. Gezeitenkräfte sorgten dann dafür, dass die Bahn innerhalb circa einer Milliarde Jahre immer kreisförmiger wurde.

Durch die Gezeitenwirkung heizte sich Triton im Lauf der Zeit stark auf. Die Spuren sieht man in den Geländeformen an der Oberfläche [5]. Tritons Oberfläche ist durch große Farbunterschiede gekennzeichnet – Hinweise auf unterschiedliche Oberflächenzusammensetzungen. Neben großen Farbunterschieden ist die Oberfläche in höher aufgelösten Bildern (Abbildungen 5 und 6) geprägt durch intensive tektonische und kryovulkanische Prozesse.



**Abb. 4** Der von Voyager 2 entdeckte, zweitgrößte Neptunmond erhielt den Namen Proteus. Der größte erkennbare Impaktkrater mit einem Durchmesser von 230 km wurde Pharos genannt (Foto: NASA/JPL).



Neben dem Saturnmond Titan ist Triton der einzige weitere Mond mit einer nennenswerten Atmosphäre. Sie besteht zum überwiegenden Teil aus Stickstoff, an der Oberfläche beträgt der Druck 0,014–0,019 mbar (1,4–1,9 Pa). Mit 38 K ist sie die kälteste bekannte Oberfläche eines Mondes.

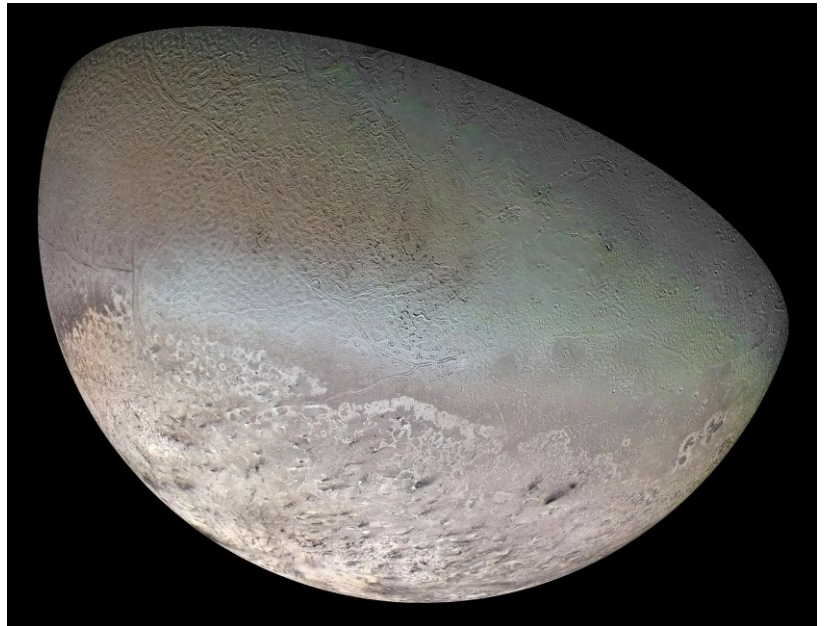
Abbildung 7 zeigt im linken Detailbild eine interessante Wirkung von Wind. Man erkennt auf ihr viele, mehrere zehn Kilometer breite und bis zu 100 km lange, dunkle Ablagerungen. Sie sind von links unten nach rechts oben gerichtet und repräsentieren Material, das von Zentren kryovulkanischer Aktivität, vermutlich Geysiren, ausgeht [5]. Stickstoff- und Methangas, befrachtet mit dunklen Partikeln, steigt von diesen Förderzentren etwa 8 km in die Atmosphäre bis zu einer Inversionsschicht auf, wird von vorwiegend aus Südwest wehenden Winden verfrachtet und dann wieder abgelagert. Dieses Gebiet liegt im Bereich der Südpolregion, die neben Stickstoffeis auch organische Bestandteile wie Tholine [4] enthält. Man findet diese Substanzen auch auf Jupiter- und Saturnmonden, wo sie sich durch ihre rötliche Färbung (Abbildung 5 und 6) auszeichnen (siehe hierzu auch Teil 1 in Heft 1/2020). Abbildung 6a zeigt zudem im oberen Teil lineare, mehrere 100 km lange Double Ridges. Sie haben große Ähnlichkeit mit denselben Formationen auf Europa, auch im Hinblick auf mögliche Entstehungsmodelle [5].

Kryovulkanische Geländeformen sind zahlreich auf Triton. Abbildung 6 zeigt rechts einige gefrorene „Seen“, vermutlich ursprünglich mit Kryomagma gefüllte Calderen (rechts oben in Abbildung 6b). Es ist nicht geklärt, wann dieser Vulkanismus aktiv war. In Nachbarschaft dieser Calderen gibt es eine Geländeform, die nur auf Triton nachzuweisen ist und wegen der morphologischen Ähnlichkeit zur Rinde einer speziellen Melonenart als *Cantaloupe Terrain* [5] bezeichnet wird. Als Entstehungsprozess wird auch hier Kryovulkanismus vermutet, alternativ könnten Sublimationsprozesse am Werk sein [5].

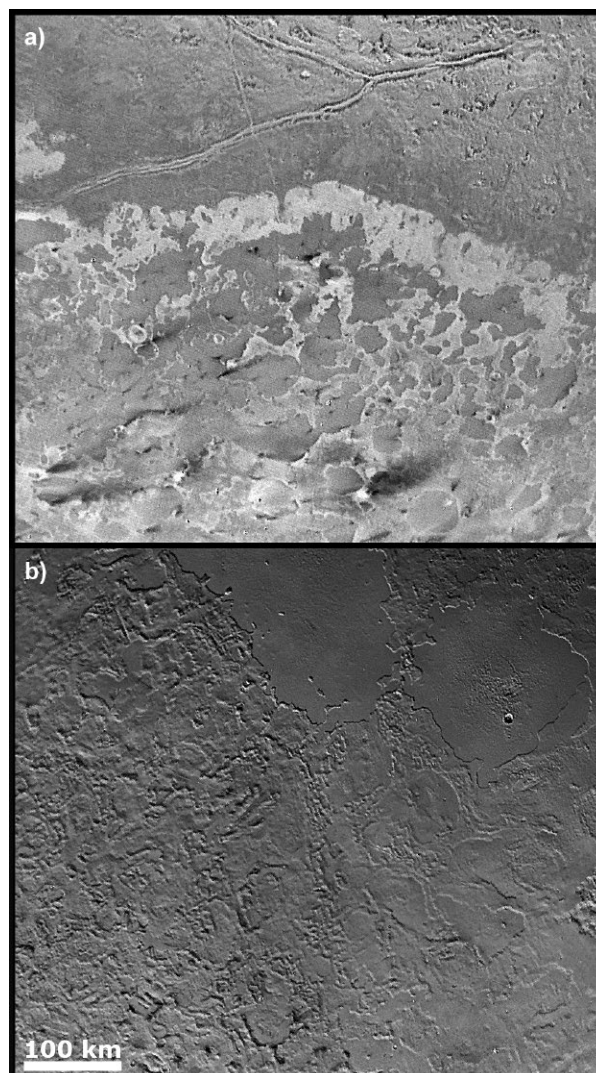
Die Oberfläche weist sehr wenige Krater auf, sie ist daher bemerkenswert jung, vielleicht nur wenige Millionen Jahre [5]. Die in der Südpolregion heute beobachtbare Geysirtätigkeit ist ein eindeutiges Indiz dafür, dass Triton geologisch aktiv ist. Ungeklärt ist jedoch, was den rezenten Kryovulkanismus und die vermutlich auch jungen tektonischen Formen hervorruft.

Die beiden Eisriesen Uranus und Neptun, ihre Ringsysteme und ihre Monde stellen bemerkenswerte planetare Körper dar, deren Eigenschaften mit Voyager 2 nur oberflächlich erforscht werden konnten. Sie sind sowohl im Hinblick auf vergleichende Planetologie im Sonnensystem als auch im Vergleich mit den nun in großer Zahl bekannten extra-

**Abb. 6 Details der Oberfläche des Neptunmondes Triton. Oben: helle und dunkle Gebiete, Ablagerungen von Wind, und lineare Bergrücken, ähnlich denen auf Europa. Unten: gefrorene Seen, vermutlich Calderen ehemaliger kryovulkanischer Aktivität (NASA/JPL/USGS).**



**Abb. 5 Detail-Farbansicht der Südpolregion des Neptunmondes Triton, aufgenommen von Voyager 2 (Foto: NASA/JPL/USGS).**



solaren Planeten interessant. Deshalb ist derzeit eine noch unbenannte Orbitermission ähnlich Galileo und Cassini in Planung. Sie soll unter Federführung der NASA ablaufen mit Beteiligung der ESA. Der Start soll nach 2030 stattfinden, sodass die Sonden um 2040 ihre Ziele erreichen könnten. Beide Orbiter sollen eine Abwurfsonde mitführen, die, ähnlich wie bei der Jupitersonde Galileo, die Atmosphären der beiden Planeten erforschen sollen. Weiterer Schwerpunkt ist die Erforschung der Monde. Bei Neptun gibt es ein noch

ehrgeizigeres Ziel: Hier soll zusätzlich eine Sonde auf Triton landen (siehe „Internet“ auf S. 77).

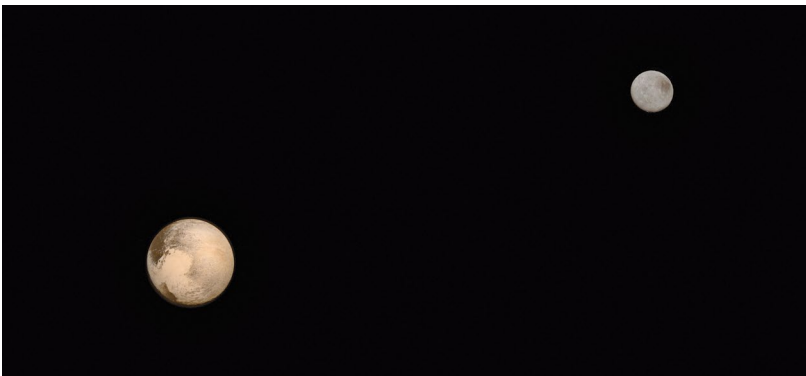
### Die Monde des Zwergplaneten Pluto

Der 1930 von Clyde Tombaugh nach intensiver Suche entdeckte Pluto galt damals als neunter Planet. Die International Astronomical Union (IAU) erkannte Pluto 2006 den Planetenstatus ab und reichte ihn in die neu geschaffene Kategorie Zwergplanet ein. Pluto benötigt für den Umlauf um die Sonne auf einer stark exzentrischen ( $e = 0,249$ ) und geneigten Bahn ( $i = 17,16^\circ$ ) 248 Jahre. Sein verhältnismäßig großer Mond Charon wurde 1978 entdeckt. Im Jahre 2001 genehmigte die NASA nach einer Reihe nicht weiter verfolgter projektierter Missionen im Rahmen des neu geschaffenen New Frontiers Program schließlich eine Mission zu Pluto und seinen Monden, um den letzten der ehemals neun Planeten des Sonnensystems durch einen Vorbeiflug zu erforschen. Die Sonde New Horizons startete am 19. Januar 2006 und erreichte nach einer Flugzeit von mehr als neun Jahren schließlich ihr erstes Ziel. Am 14. Juli 2015 passierte New Horizons Pluto in einem minimalen Abstand von der Oberfläche von 11 317 km [8] und flog weiter in den Kuiper-Gürtel.

Pluto und Charon können aufgrund ihres Größenverhältnisses und ihrer Entfernung als eine Art Doppelplanet betrachtet werden. Abbildung 7 zeigt beide Körper in korrekter Größe und Entfernung zueinander. Im Vergleich zu Pluto, der aus Platzgründen in diesem Artikel nicht detailliert besprochen werden kann, erscheint der Farbkontrast von Charon bei Verwendung gleicher Farbfilter ohne Zuhilfenahme weiterer Kontrastmanipulationen geringer. Beim Vorbeiflug gelang New Horizons eine genauere Bestimmung von mittleren Durchmessern und mittlerer Dichte beider Objekte (Tabelle 1). Demnach beträgt der Durchmesser von Charon  $1212 \pm 6$  km, der von Pluto  $2374 \pm 8$  km [8]. Pluto ist damit sogar kleiner als der größte Neptunmond Triton (2705 km). Die mittleren Dichten betragen jeweils  $1702 \pm 21$  kg/m<sup>3</sup> bei Charon und  $1860 \pm 13$  kg/m<sup>3</sup> bei Pluto [8]. Sie sind vergleichbar mit denen der drei größten Eismonde Ganymed, Callisto und Titan mit ähnlichen Eis-Fels-Anteilen.

Spektrale Untersuchungen ergaben, dass Wassereis auf der während des New-Horizon-Vorbeiflugs erforschten Hemisphäre Charons überall verbreitet ist und bestätigten somit erdgebundene Beobachtungen [9]. Ein Absorptionsband bei  $2,22 \mu\text{m}$  wird dem Vorkommen von Ammoniumhydraten zugeschrieben, die teilweise in einigen der hellen Strahlenkrater konzentriert sind [9].

Farbkontrastverstärkte Bilddaten der Kamera zeigen auf Charon eine ausgesprochen vielgestaltige Geologie (Abbildung 8). Viele der Oberflächenformen wurden von den Kamerateams benannt, aber zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Artikels hat die IAU erst zwölf Namen genehmigt (siehe „Internet“ auf S. 77). Geländeformen wie Krater, Berge, Grabenstrukturen usw. werden laut IAU-Regeln nach Autoren und Künstlern benannt, die in Verbindung



**Abb. 7** Pluto und Charon in richtigem Größenverhältnis und Abstand zueinander. Aufgenommen mit New Horizons aus 250 000 km Entfernung am 14.7.2015 (Foto: NASA/JHUAPL/SWRI).



**Abb. 8** Kontrastverstärktes Falschfarbenbild von Plutos größtem Mond Charon, aufgenommen von New Horizons am 14. 7. 2015 in den Farbfiltern Blau, Rot und Infrarot (Foto: NASA/JHUAPL/SWRI).



mit der Erforschung von Pluto und des Kuiper-Gürtels stehen. Zusätzliche Quellen für Namen sind Orte, Fahrzeuge, Reisende und Autoren aus dem Bereich der Dichtung (Science Fiction und Fantasy) und der Mythologie.

Die von New Horizons detailliert erforschte Hemisphäre erscheint zweigeteilt: im Norden ein stark zerklüftetes Gebiet mit vielen Einschlagskratern, im Süden eine glatte, ebenfalls kraterreiche Ebene (Namensvorschlag Vulcan Planum) mit einer Reihe linearer bis gekrümmter Bruchstrukturen [10]. Bergrücken und Canyons, die etwa in Ost-West-Richtung verlaufen, bilden die Grenze beider Provinzen. In diesen beiden Regionen ist die Kraterdichte nahezu gleich, das Hochland weist aber deutlich mehr größere Krater auf als Vulcan Planum.

Abbildung 9 stellt einige geologische Besonderheiten aus Abbildung 8 im Detail dar. Die Nordpolregion ist geprägt von einer rötlichen Kappe, die informell den Namen Mordor Macula (Abbildung 9a) erhielt [10]. Die Zusammensetzung dieses Materials und der Ursprung der roten Färbung waren jedoch nicht zu ermitteln – mit dem Spektrometer konnten keine signifikanten Absorptionsbanden festgestellt werden, die das Vorhandensein bestimmter Minerale oder Moleküle anzeigen. Vermutlich sind die Ablagerungen nicht mächtig genug, oder der Spektralbereich überdeckte nicht die charakteristischen Absorptionsbanden dieses Materials. Südöstlich von Mordor Macula liegt der etwa 230 km große Krater Dorothy, auf seinem Kraterand und in der Umgebung überlagert von geologisch jungen, hellen Strahlenkratern.

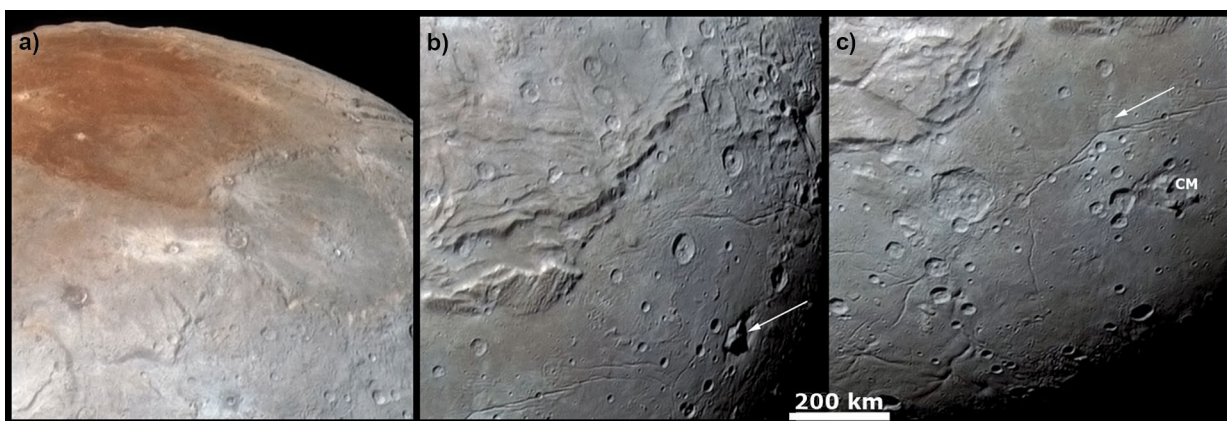
Abbildung 9b zeigt die tektonisch geprägte Grenze zwischen den nördlichen Hochländern und den südlichen, tiefer gelegenen Regionen. Die Grabenstrukturen Mandjet und Argo Chasma sind mehrere 10 bis zu mehr als 200 km breit und 3 bis 6 km tief [10]. Vermutlich handelt es sich um Dehnungsstrukturen, ähnlich denen auf anderen Eissatelliten. Da einige große Krater diese tektonischen Strukturen überlagern, ist zu vermuten, dass sie sehr alt sind, vermutlich mehr als vier Milliarden Jahre [10]. In den süd-

lichen Tiefländern ragen 3 bis 4 km hohe Berge auf (Kubrick Mons, Clarke Montes), umgeben von 1 bis 2 km tiefen Strukturen, die „Burggräben“ (*moats*) vergleichbar sind. Diese topographischen Unterschiede werden hier verstärkt durch den niedrigen Sonnenstand nahe des Terminators (Pfeil in Abbildung 9b). Die Strukturen entstanden vermutlich, als die Masse des Berges auf weicherem Material bis zu einer bestimmten Tiefe einsank [10].

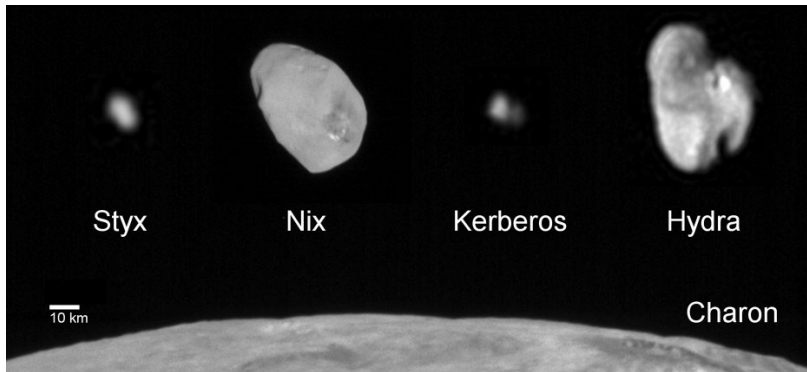
Die südlichen Tiefländer Vulcan Planum sind dicht bekratert und somit ebenfalls etwa vier Milliarden Jahre alt. Sie weisen zudem ein Netzwerk an linearen oder gekrümmten Rillen auf (Abbildung 9c). In der Nähe der Bergkette Clarke Montes (CM in Abbildung 9c) befindet sich eine pfannkuchenförmige Struktur (Pfeil) mit circa 20 km Durchmesser, die der Wirkung von Kryovulkanismus zugeschrieben wird [10]. Die tektonischen Strukturen stammen wohl von einer globalen Dehnung Charons, die sich vermutlich früh in seiner Geschichte vollzog. Eine weitere Ursache der Tektonik könnte in einem Ausfrieren eines Wasserozeans unter der Oberfläche in der Frühzeit des Mondes liegen [10].

Der Vollständigkeit halber seien Plutos vier kleinere, unregelmäßig geformte Monde erwähnt. Abbildung 10 zeigt sie in der Reihenfolge von innen nach außen (links nach rechts) und im richtigen Größenverhältnis zueinander: Styx ( $16 \times 9 \times 8 \text{ km}^3$ ), Nix ( $50 \times 35 \times 33 \text{ km}^3$ ), Kerberos ( $19 \times 10 \times 9 \text{ km}^3$ ) und Hydra ( $65 \times 45 \times 25 \text{ km}^3$ ) [11]. Die Monde wurden zwischen 2005 und 2012 mit dem Weltraumteleskop Hubble entdeckt. Ihre Albedo ist sehr hoch, ein Indiz dafür, dass ihre Oberflächen von Wassereis geprägt sind.

Einige besitzen eine langgezogene Form und scheinen aus zwei unterschiedlich großen Bestandteilen zu bestehen (insbesondere Hydra und Kerberos) – ein Charakteristikum einer Reihe von kleineren Körpern im Asteroiden- und Kuiper-Gürtel. Es resultiert vermutlich daraus, dass sich zwei benachbarte Körper zu einem einzigen Objekt zusammengeschlossen haben [11]. Es wird angenommen,



**Abb. 9** Details auf Charon, a) die rötlich-braune Nordpolkappe mit Krater Dorothy und jungen Strahlenkratern; b) tektonische Dehnungsstrukturen und Gruppen von Hügeln mit umgebender Vertiefung (Pfeil); c) Fließstrukturen, vermutlich kryovulkanischer Natur (Pfeil) (Foto: NASA/JHUAPL/SWRI).



**Abb. 10** Die fünf kleinen Plutomonde in richtigem Größenmaßstab zueinander. Die Bilder der Monde entstanden aus einer Kombination der Daten von zwei Instrumenten auf New Horizons (Foto: NASA/JHUAPL/SWRI).

dass die Monde aus dem restlichen Material entstanden, als zwei große Kuiper-Gürtel-Objekte vor mehr als vier Milliarden Jahren miteinander kollidierten und sich daraus der Doppelkörper Pluto und Charon formte [11]. In einigen der besser aufgelösten Bilder dieser Monde sind als einzige Geländeformen kleinere Impaktkrater zu erkennen. Aus der Häufigkeit dieser Krater wurde ein wahrscheinliches Alter der Monde von mindestens vier Milliarden Jahren abgeleitet, vergleichbar dem Alter der Kraterebenen auf Charon.

### Weiterer Verlauf der Mission New Horizons

Die Aufgabe von New Horizons war mit dem Vorbeiflug an Pluto und seinen Monden nicht erfüllt. Die Sonde dringt weiter in den Kuiper-Gürtel vor und hat am Neujahrstag 2019 ein weiteres Objekt (486958) 2014 MU<sub>69</sub>, zunächst informell Ultima Thule genannt, in einer Entfernung von 3500 km passiert und beobachtet (Physik in unserer Zeit **2019**, 50(2), 63). Im November 2019 erhielt der Körper die offizielle Bezeichnung Arrokoth. Die von diesem Vorbeiflug gewonnenen Daten werden erst bis Ende 2020 alle auf der Erde angekommen sein. Geplant ist im Verlauf der kommenden Jahre mindestens ein weiterer Vorbeiflug an einem Kuiper-Gürtel-Objekt, das aber noch nicht endgültig identifiziert ist.

#### INTERNET

Voyager-Mission  
[www.nasa.gov/mission\\_pages/voyager](http://www.nasa.gov/mission_pages/voyager)

Mission zu Uranus und Neptun  
<https://t1p.de/Eisriesen-Mission>

New Horizons  
<http://pluto.jhuapl.edu>

Planetare Namensgebung der IAU  
<https://planetarynames.wr.usgs.gov>

### Zusammenfassung

Die Eismonde von Uranus, Neptun und Pluto wurden bislang nur von zwei Raumsonden erforscht: Voyager 2 und New Horizons. Ihre Aufnahmen zeigen eine große Vielfalt an Oberflächenformationen. Diese Eismonde weisen Ähnlichkeiten mit denen von Jupiter und Saturn auf. So gibt es offensichtlich auch im äußersten Bereich des Sonnensystems Kryovulkanismus. Auch Dehnungsstrukturen und mögliche Auswirkungen von planetaren Kollisionen sind erkennbar. Mehr als 50 Jahre nach Voyager 2 gibt es Pläne für eine neue Mission ins Uranus- und Neptunsystem. Noch weitgehend unerforscht sind die Zwergplaneten und kleineren Körper im Kuiper-Gürtel. Der Vorbeiflug an Pluto und Charon im Juli 2015 war ein erster Blick in diese noch sehr fremde Welt. Entwürfe für weitere Missionen in den Kuiper-Gürtel, zumindest seitens der NASA, existieren bereits auf dem Reißbrett für die Zeit nach 2040.

### Stichwörter

Eismonde, Uranusmonde, Neptunmonde, Triton, Charon, Miranda, Ariel, Umbriel, Titania, Oberon, Kryovulkanismus, Voyager 2, New Horizons, Arrokoth.

### Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

### Literatur

- [1] B. A. Smith et al., Science **1986**, 233, 43.
- [2] H. Hussmann et al., in: Landolt-Börnstein, Gruppe VI: Astron. & Astrophys., Bd. 4, Subvol. B – Solar System (Hrsg.: J. E. Trümper), Springer, Heidelberg **2009**, 163.
- [3] A. Coradini et al., Space Sci. Rev. **2010**, 153, 411.
- [4] J. B. Dalton et al., Space Sci. Rev. **2010**, 153, 113.
- [5] L. M. Prockter et al., Space Sci. Rev. **2010**, 153, 63.
- [6] B. A. Smith et al., Science **1989**, 246, 1422.
- [7] G. Schubert et al., Space Sci. Rev. **2010**, 153, 447.
- [8] S. A. Stern et al., Science **2016**, 350, aad1815-1.
- [9] W. M. Grundy et al., Science **2016**, 350, aad9189-1.
- [10] J. M. Moore et al., Science **2016**, 350, 1284.
- [11] H. A. Weaver et al., Science **2016**, 350, aae0030-1.

### Der Autor



Roland Wagner war bis Juni 2019 Planetengeologe am Institut für Planetenforschung im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin-Adlershof. Er wertete als Associate Team Member des SSI-Kamerateams des Galileo- und Cassini-Projekts Bilder der Eismonde aus, mit Schwerpunkt auf Oberflächenformen, geologischen Prozessen und Altersbestimmungen mithilfe von Impaktkrater-Häufigkeiten.

#### Anschrift

Dipl.-Geol. Dr. Roland Wagner, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Planetenforschung, Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin-Adlershof.  
Roland.Wagner@dlr.de